

### Выводы

1. Несмотря на наличие большого числа факторов, определяющих в ленточной пиле действие касательных и нормальных напряжений, последние нельзя просто суммировать при оценке напряженного состояния ленточных пил. Необходимо производить учет их по участкам пилы, иначе получается завышенная оценка уровня действующих напряжений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грубе А.Э. Станки и инструменты по деревообработке. — М.-Л.: Гослесбумиздат, 1949. — 703 с.
2. Феоктистов А.Е. Ленточнопильные станки. — М.: Лесная промышленность, 1976. — 152 с.
3. Шилько В.К. Определение ресурса работы ленточных пил по несущей способности при распиловке древесины // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 1999. — № 1. — С. 176—182.
4. Андреев А.В. Передача трением. — М.: Машиностроение, 1978. — 176 с.
5. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
6. Bowden F.P., Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids. — Oxford at the Clarendon Press, 1964. — P. 544.
7. Гриняев Ю.В., Чертова Н.В. Полевая теория дефектов. Часть 1 // Физическая мезомеханика. — 2000. — Т. 3. — № 5. — С. 19—32.
8. Кондратюк А.А., Шилько В.К. Особенности формирования касательных напряжений при передаче рабочего движения в механизмах резания ленточнопильных станков // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 1. — С. 134—136.
9. Светлицкий В.А. Передачи с гибкой связью. — М.: Машиностроение, 1967. — 153 с.
10. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. — М.: Издательство стандартов, 1985. — 31 с.

УДК 621.3

## УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

З.А. Беллуян

Государственный инженерный университет Армении. г. Ереван

*Предложена методика выбора параметров форсированного режима и обоснованы верхние границы факторов при проведении ускоренных испытаний обмоток статора и ротора синхронных генераторов. Приведены результаты ускоренных испытаний конкретных генераторов и получено уравнение регрессии. Методика может быть использована для любых электротехнических изделий при соответствующих планах испытаний.*

Для генераторов, время безотказной работы (наработка на отказ) которых составляет более 1000 ч, испытания на надежность обычно проводятся с форсированием основных действующих факторов. Такие испытания называются ускоренными.

В настоящее время имеется ряд работ, в которых рассмотрены проблемы ускоренных испытаний для различных узлов генераторов: блока регулирования напряжения, подшипникового узла и контактно-щеточного узла [1].

В данной работе приведены результаты исследований, направленные на разработку методики ускоренных испытаний обмоток статора и ротора генераторов.

В условиях эксплуатации генераторы различного назначения и исполнения подвергаются различ-

ным воздействиям: температура, влажность, запыленность, ударные нагрузки, вибрация и т.д. [2]. Чтобы выбрать тот или иной фактор, необходимо учесть степень их влияния на надежность данного узла и, что главное, — контролируемость и возможность регулирования их величин в заданных пределах. Поскольку температура обмотки и вибрация наиболее интенсивно влияют на надежность и они контролируемы, и их уровни можно регулировать, то в качестве форсирующих факторов для обмоток статора и ротора выбраны температура и вибрация.

При проведении испытаний в ускоренных режимах воспроизводятся также другие значимые факторы, такие как влажность, запыленность окружающей среды и ударные нагрузки. Уровни этих факторов должны соответствовать реальным условиям эксплуатации генераторов.

**Таблица 1.** Уровни форсирующих факторов и интервалы их варьирования

Независимые переменные	Уровень изменения переменных			Интервал изменения переменных	Независимые переменные в относительных единицах
	нижний -1	нулевой 0	верхний +1		
Температура обмотки ротора	125 °С	152,5 °С	180 °С	27,5 °С	$X_{1p} = \frac{T - 152,5}{27,5}$
Температура обмотки статора	130 °С	145 °С	160 °С	15 °С	$X_{1cm} = \frac{T - 145}{15}$
Вибрация, мкм	40	55	70	15	$X_2 = \frac{A - 55}{15}$

Для обмоток статора и ротора генератора задача нахождения максимального уровня форсирования решается анализом влияния предельных величин нагрузок, приводящих к отказу без изменения физики разрушения или старения.

Предельная температура обмоток при ускоренных испытаниях генераторов устанавливается в пределах, при которых температура отдельных узлов генератора не превышала бы предельных величин, установленных для этих узлов. Исследования показали, что при данных условиях предельные температуры обмоток не должны превышать: для класса нагревостойкости изоляции обмоток В – 180 °С, F – 190 °С, а для класса Н – 220 °С [1].

Необходимое значение температуры обмоток ротора при ускоренных испытаниях достигается изменением расхода охлаждающего воздуха (путем дросселирования вентиляционных окон), проходящего через генератор при заданной температуре воздуха, окружающего генератор [2].

Требуемая амплитуда вибрации обмоток достигается созданием дополнительной неуравновешенности ротора генератора

Уровни форсирующих факторов и интервалы их варьирования для обмоток статора и ротора приведены в табл. 1.

Испытания обмоток производится в составе генератора [1, 2].

До проведения приработочных испытаний генератор разбирается, и на лобовых частях обмотки статора, на выходе из паза устанавливаются термодатчики и вибродатчики.

Температура обмоток ротора и статора устанавливается изменением расхода охлаждающего воздуха и контролируется через каждые 150 ч работы, а требуемые значения уровня вибрации обмоток статора и ротора устанавливаются с помощью добавляемых масс дисбаланса в пазах балансировочных дисков [1] и контролируются через каждые 50 ч работы генератора.

Критериями отказов обмоток статора и ротора являются: пробой межвитковой и корпусной изоляции; межвитковые замыкания; замыкание витков между собой и на корпус и обрыв витков.

По сути мы имеем дело с двумя независимыми переменными  $X_1$  и  $X_2$ , каждую из которых варьировем в двух уровнях, условно обозначенных символами "+1" и "-1". В запланированном эксперименте проводится полный факторный эксперимент типа  $2^2$ .

Матрица планирования и кодовые значения переменных представлены в табл. 2 [3]. А уравнение регрессии для этого вида планирования имеет вид [2, 3]:

$$T = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2,$$

где  $T$  – наработка на отказ;  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  – коэффициенты уравнения регрессии, значения которых определяются по данным испытаний согласно [3].

$$\sum_{n=1}^N Y_n / N; b_1 = \sum_{n=1}^N X_{1n} Y_n / N; b_{ij} = \sum_{n=1}^N X_{in} X_{jn} Y_n / \sum_{n=1}^N X_{in}^2.$$

Как видно из табл. 2, для полного факторного эксперимента типа 2 требуется провести 5 опытов. Количество повторяемости опытов на каждом уровне из соображений получения требуемой точности принято 4, т.е. проведено 20 опытов (экспериментов).

**Таблица 2.** План факторного эксперимента для двух независимых переменных

Номер эксперимента	Факторы				Вектор выхода
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	
Планирование типа $2^2$					
1	+1	+1	+1	+1	$Y_1$
2	+1	+1	-1	-1	$Y_2$
3	+1	-1	+1	-1	$Y_3$
4	+1	-1	-1	+1	$Y_4$
Нулевая точка					
5	+1	0	0	0	$Y_0$

Для каждой строки матрицы планирования определяются средние значения наработки до отказа. Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии производится по  $t$ -критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95, а проверка адекватности – по критерию Фишера [3].

Испытаниям на надежность подвергались 16 генераторов серии ОС (8 генераторов типа ОС-71 мощностью 16 кВт и 8 генераторов типа ОС-72 мощностью 30 кВт). Половина указанных генераторов работала в режиме двигателя. Испытания ге-

**Таблица 3.** Зачетные отказы обмоток статора и ротора

Номера п/п	Заводской номер генератора (Г), двигателя (Д)	Фактическая наработка в ускоренном режиме, ч	Наработка при нормальных условиях, ч	Обмотки ротора		Обмотки статора	
				Количество отказов, шт	Время отказов, ч	Количество отказов, шт	Время отказов, ч
1	Г427 (30 кВт)	5169	31000	1	12	1	1190
2	Д422 (30 кВт)	5169	31000	1	14	–	–
3	Г417 (30 кВт)	2548	150000	1	312	1	998
4	Д420 (30 кВт)	2548	15000	–	–	2	894; 1138
5	Г416 (30 кВт)	3307	200000	2	3; 2401	2	2203; 2401
6	Д434 (30 кВт)	3307	20000	2	10; 1663	1	200
7	Г418 (30 кВт)	2083	12000	1	1387	2	1387; 1410
8	Д435 (30 кВт)	2083	12000	–	–	–	–
9	Г485 (16 кВт)	5657	34000	1	1243	–	–
10	Д478 (16 кВт)	5657	34000	–	–	–	–
11	Г479 (16 кВт)	5936	35000	–	–	–	–
12	Д486 (16 кВт)	5936	35000	1	2228	–	–
13	Г 480 (16 кВт)	5707	34000	1	4652	–	–
14	Д483 (16 кВт)	5707	34000	1	2915	1	4335
15	Г477 (16 кВт)	6497	39000	–	–	–	–
16	Д481 (16 кВт)	6497	39000	–	–	–	–

**Таблица 4.** Нарботка на отказ генераторов при испытаниях

Номер эксперимента	Номера генераторов (Г) и двигателей (Д), работающих в заданных режимах		Наработка, ч	
	обмотка статора	обмотка ротора	обмотка статора	обмотка ротора
1	Д422, Г427, Г416, Д420	Г427, Г416, Г485	3040	3033
2	Г417, Г479, Г418	Г418, Г479	3255	7217
3	Д434, Д478, Г485, Д486	Д434, Д478, Д486, Д483	20573	4926
4	Г480, Д481, Г437	Д420, Д435, Г481, Г480	39976	16835
5	Г477, Д435	Г471, Г417, Д422	7790	6469

нераторов и их узлов проведены по плану [N, U, T]. В процессе испытаний зафиксированы как внезапные, так и износные отказы.

Зачетные отказы обмоток статора и ротора приведены в табл. 3, а в табл. 4 приведена наработка на отказ агрегатов (генераторов и двигателей) при испытаниях.

После оценки значимости коэффициентов получены следующие уравнения регрессии, связывающие наработку на отказ обмоток с действующими факторами:

– для обмотки ротора

$$T_{об.рот.} = 7686 - 2877X_1 - 4023X_2 + 1931X_1X_2,$$

– для обмотки статора

$$T_{об.ст.} = 15510 - 13510X_1 - 4905X_2 + 4797X_1X_2.$$

По полученным уравнениям регрессии определяются коэффициенты ускорения испытаний в зависимости от уровней действующих факторов:

$$K_{Y_i} = T_{н_i} / T_{в_i},$$

где  $T_{н_i}$  и  $T_{в_i}$  – наработки на отказ соответственно при нижних и верхних значениях уровней действующих факторов.

Нижний уровень действующих факторов соответствует условиям нормальной эксплуатации, заданным в ТЗ или ТУ на генераторы, а верхний – ускоренному режиму воздействия при ускоренных испытаниях на надежность.

Если учесть, что основная часть серийно выпускаемых генераторов мощностью до 100 кВт конструктивно практически одинаковы, изготавливаются из одних и тех же конструкционных и изоляционных материалов, то для определения влияния различных уровней внешних действующих факторов на надежность генератора и его обмоток статора и ротора в процессе проектирования можно воспользоваться полученными выше зависимостями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отраслевой стандарт ОСТ 16 0.801.218-84. Машины электрические вращающиеся от 63 до 355 габарита включительно. Генераторы синхронные явнополюсные высокоскоростные. Методика ускоренных испытаний на надежность. – М.: Стандартэлектр, 1984.
2. Беллуян З.А. Основные принципы разработки ускоренных испытаний генераторов на надежность // Информационные Технологии и Управление (Ереван). – 2001. – № 1.
3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экспериментальных исследований. – М.: Наука, 1965.